

| | |
|-------------|---|
| Title | Sensitivity analysis and optimization methods for thermoelectric devices and their modules(Abstract_要旨) |
| Author(s) | Furuta, Kozo |
| Citation | Kyoto University (京都大学) |
| Issue Date | 2018-03-26 |
| URL | https://doi.org/10.14989/doctor.k21099 |
| Right | |
| Type | Thesis or Dissertation |
| Textversion | ETD |

| | | | |
|--|---|----|---------|
| 京都大学 | 博士（工学） | 氏名 | 古 田 幸 三 |
| 論文題目 | Sensitivity analysis and optimization methods for thermoelectric devices and their modules (熱電素子および熱電モジュールを対象とした感度解析および最適設計手法) | | |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、熱電アクチュエータの性能向上を目的とし、アクチュエータ部のモジュール構造を対象としたトポロジー最適設計法の構築、およびアクチュエータを構成する熱電素子材料の微視構造の最適設計に必要な感度解析手法の構築をまとめたものであって4章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、熱電素子とそのアプリケーションの説明、構造最適化の分類とそれらに関する研究の発展の経緯について概観し、本研究の目的および論文の構成について述べている。</p> <p>第2章は、レベルセット法に基づく熱電アクチュエータの稼動部を対象としたトポロジー最適設計法の構築を行っている。熱電アクチュエータは、熱電素子を熱源に用いることにより、加熱による熱膨張に加えて冷却による熱収縮の効果も利用可能であるため、ジュール熱による熱膨張のみを利用した熱アクチュエータよりも複雑な動作が可能となる点が特徴である。構造最適化法、なかでも最も設計自由度の高いトポロジー最適化法を用いることで、このような熱電アクチュエータの抜本的な性能向上が期待される。しかしながら、熱電アクチュエータのトポロジー最適化のためには、従来の熱アクチュエータのトポロジー最適化法において用いられる物理モデルではなく、熱電素子におけるペルチェ効果も解析可能な、より複雑な物理モデルに基づく方法論の構築が必要であり、未だ報告例はない。このような背景から、本章では、ペルチェ効果も解析可能な物理モデルに基づいて、熱電アクチュエータの稼動部を対象としたトポロジー最適設計法の構築を行っている。具体的にはまず、動作部の変位最大化を目的とした最適化問題を定式化している。次に、従来考慮されなかった温度場と電場が相互に依存し合う強連成の問題を含む、温度場、電場、変位場三種類のマルチフィジックス問題に対して、ラグランジュ未定乗数法を用いた随伴変数法に基づく設計感度の導出を行っている。この際、アクチュエータを対象とした従来の最適化法では扱われなかった物性値の温度依存性についても考慮した設計感度の導出に成功している。そして、2つの数値例を通し、提案手法の有効性を示している。これらの数値例では、従来の加熱のみを利用した熱アクチュエータとは異なり、熱電素子特有の加熱と冷却両方の効果を使用した熱電アクチュエータの構造設計案が得られることを示している。数値例の中で、最適構造に対する物性値の温度依存性の影響を検証しており、従来の熱アクチュエータの最適設計法では無視されてきた物性値の温度依存性を考慮することで、より高性能な熱電アクチュエータの構造設計案が得られることを示し、本提案手法の有効性を明らかにしている。以上、第2章では従来の熱膨張のみを利用した熱アクチュエータに比べ、熱電素子を熱源とする、より複雑な動きが可能な熱電アクチュエータのトポロジー最適設計法の構築を行っている。</p> <p>第3章は、革新的な材料特性をもった熱電素子材料の開発のために、温度の不連続性を伴う微視系熱伝導問題を対象とした設計感度解析手法の構築を行っている。フーリエ則に従う巨視系熱伝導と異なり、微視構造内において熱は弾道的に伝導し、材料界面において温度が不連続になることが知られており、熱の伝導をフォノンの流れと</p> | | | |

| | | | |
|--|--------|----|---------|
| 京都大学 | 博士（工学） | 氏名 | 古 田 幸 三 |
| <p>して捉え、そのフォノンをキャリアとするボルツマン輸送方程式に基づく平衡場の解析が必要となる。一方で、この材料界面における不連続性を利用し、低熱伝導特性をもった高性能な熱電素子材料の開発が近年盛んに行われている。しかしながら、その設計手法は未だなく、その開発は試行錯誤的である。そこで本研究では、最適設計法構築のための基礎となる材料界面における不連続条件を厳密に考慮した設計感度解析手法を世界に先駆けて構築している。具体的にはまず、ボルツマン輸送方程式に基づく最適設計問題の定式化を行っている。そして、ラグランジュ未定乗数法を用いた随伴変数法に基づく設計感度の導出を行っている。本手法において、ラグランジアン の定義に界面における不連続条件を組み込むことで、従来の拡散方程式に基づく熱伝導問題やボルツマン方程式に基づく流体問題を対象とした感度解析手法では扱われてこなかった材料界面における状態変数の不連続性を考慮することに成功している。そして、6つの数値例において、得られた設計感度と有限差分感度の比較を通し、提案した感度解析手法の妥当性を検証している。具体的には、熱電素子材料の性能向上に必要な低熱伝導率を達成するために、数値例にて熱流束最小化および系の温度差最大化を目的汎関数として、それぞれ比較を行い、本提案手法が熱電素子材料開発に有効な指針となることを確かめている。また、領域全体の温度最大化および最小化、そして、特定領域のエネルギー最小化を目的汎関数とした場合についても検証を行っており、本感度解析手法が熱電素子材料開発だけでなく、その他電子デバイスの排熱性向上などの熱制御設計に対しても有効であることを示している。以上、第3章では微視構造を対象とした最適設計法の基礎となる、微視系熱伝導問題を対象とした設計感度解析手法の構築を行っている。</p> <p>第4章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p> | | | |

| | |
|-----|---------|
| 氏 名 | 古 田 幸 三 |
|-----|---------|

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、熱電アクチュエータの性能向上を目的とし、アクチュエータ部のモジュール構造を対象としたトポロジー最適設計法の構築、およびアクチュエータを構成する熱電素子材料の微視構造の最適設計に必要な感度解析手法の構築を行ったものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. レベルセット法に基づく熱電アクチュエータを対象としたトポロジー最適設計法について提案した。具体的には、まず、動作部の変位最大化を目的とした最適化問題の定式化を行った。次に、従来考慮されなかった、温度場と電場が相互に依存し合う強連成の問題を含む、温度場、電場、変位場三種類のマルチフィジックス問題に対して設計感度を導出した。そして、数値例を通し、提案手法の有効性を示した。この数値例では、従来の加熱のみを利用した熱電アクチュエータとは異なり、熱電素子特有の加熱と冷却両方の効果を利用した熱電アクチュエータの構造設計案が得られることを示した。

2. 温度の不連続性を伴う微視系熱伝導問題を対象とした設計感度解析手法の提案を行った。巨視系と異なり微視系熱伝導では、弾道的な熱伝導や材料界面における温度の不連続性を考慮するために、ボルツマン輸送方程式による平衡場の解析が必要となる。そこで本論文では、ボルツマン輸送方程式に基づき状態場解析を行う最適設計問題の定式化を行った。そして、従来の熱伝導問題、およびボルツマン輸送方程式に基づく流体問題を対象とした感度解析で扱われてこなかった材料界面における不連続性を考慮した感度解析手法を構築した。数値例にて、得られた設計感度と数値的に求める差分感度との比較を通し、提案した感度解析手法の妥当性を検証し、本提案手法が熱電素子材料開発の設計指針として有効であることを示した。

以上のように本論文は、熱電アクチュエータのトポロジー最適設計法および熱電材料を対象とした感度解析法の構築を行い、数値例よりその有効性を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年2月5日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降